

STUK-B 219 / LOKAKUU 2017

B

Pulssiröntgenlaitteet teollisuus- ja tutkimuskäytössä

Reetta Nylund

Pulssiröntgenlaitteet teollisuus- ja tutkimuskäytössä

Reetta Nylund

ISBN 978-952-309-392-8 (pdf)
ISSN 2243-1896

Nylund Reetta. Pulssiröntgenlaitteet teollisuus- ja tutkimuskäytössä. STUK-B 219. Helsinki 2017. 25 s.

Avainsanat: pulssiröntgenlaite, teollisuus- ja tutkimuskäyttö, mittauss, mittari, suojaetäisyys, vaatimus

Tiivistelmä

Pulssiröntgenlaitteet ovat pienitehoisia, kannettavia ja helppokäyttöisiä pulssimuotoista röntgensäteilyä tuottavia läpivalaisulaitteita, joita on teollisuus- ja tutkimuskäytössä. Niitä on käytössä yksityisillä toiminnanharjoittajilla sekä viranomaisilla. Pulssiröntgenlaitteita käytetään tyypillisesti esimerkiksi kiinteistöjen putkistokuvauksissa sekä erilaisissa teollisuuden sovellutuksissa, joissa tehdään ainetta rikkomattomia tutkimuksia.

Tässä raportissa selvitetään pulssiröntgenlaitteiden käyttöä ja käytölle asetettuja vaatimuksia Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. Tehdyn kyselytutkimuksen perusteella havaitaan, että Suomessa pulssiröntgenlaitteita käytetään enemmän kuin muissa Pohjoismaissa. Laitteiden käyttöön liittyvät vaatimukset ovat saman suuntaisia kaikissa Pohjoismaissa.

Tämän selvityksen yhteydessä tarkasteltiin pulssiröntgenlaitteilla tehtyjä mittauksia sekä tehtiin niitä lisää. Lyhyistä pulsseista ja suuresta annosnopeudesta johtuen annosnopeuden mittaaminen luotettavasti on hankalaa. Näin ollen mittaukset tulee perustaa säteilystä saatavaan annokseen. Tässä selvityksessä esitetyt annosmittaustulokset ovat yhteneviä valmistajan ja muiden toimijoiden raportoitujen mittaustulosten kanssa mittaustarkkuuden rajoissa. Mittaustulosten epävarmuus on suuri, mutta aiemmin julkaistujen tulosten ja tehtyjen toistomittausten avulla saadaan pulssiröntgenlaitteista saatavan annoksen taso selville varsin luotettavasti. Mittauksista havaitaan, että eri mittarit soveltuvat eri tavalla pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamiseen etäisyydestä ja mittarin muista ominaisuuksista riippuen.

Aiemmin julkaistujen tutkimusten sekä tehtyjen mittausten perusteella havaitaan, että pulssiröntgenlaitteista mahdollisesti saatava annos jää hyvin pieneksi. Kuvausten optimoiminen ja suojaetäisyyden noudattaminen mahdollistavat säteilyturvallisuuden toteutumisen pulssiröntgenlaitteiden käytössä.

NYLUND Reetta. Pulsed X-ray devices in the industrial and research use. STUK-B 219. Helsinki 2017. 25 s.

Key words: pulsed X-ray device, industrial and research use, measurement, dose meter, area of sheltering, requirements

Abstract

Pulsed X-ray devices are low-power, portable and easy-to-use pulsed X-ray equipment, used for different kind of industrial and research purposes. Equipment are used by private license holders and state authorities. Typical uses for pulsed X-ray devices include, for example, X-ray of pipelines for real estate as well as various industrial applications for non-destructive testing.

In this report the requirements and restrictions for the use of pulsed X-ray devices in Finland and other Nordic countries are reported. According to information given by other Nordic authorities the pulsed X-ray equipment are being used more commonly in Finland than in other Nordic countries. The requirements for the use of equipment are mainly the same in all Nordic countries.

In this report an overview of reported measurements using pulsed X-ray equipment is presented as well as some measurements are performed. The dose rate measurements are not reliable when using pulsed X-ray equipment due to extremely high dose rates and short pulses. Therefore, the measurements should be based on the dose. The results reported in here agree with previously known results within the measurement uncertainties. Measurement results have large uncertainty, but based on the published measurement results and the results reported here, realistic estimate of the dose obtained from pulsed X-ray equipment can be obtained. It is further observed, that depending on the measurement distance and other properties of the dose meters, different type of dose meters are applicable to measure pulsed X-rays in different situations.

Based on the reported and measured doses, the dose obtained from the pulsed X-ray devices is very small. If the scanning is properly optimized as well as the manufacturers instructions are strictly followed, the use of pulsed X-ray devices is safe.

Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	7
2 PULSSIRÖNTGENLAITTEIDEN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA JA TUTKIMUKSESSA	8
2.1 Käyttökohteet	8
2.2 Suomessa käytössä olevat laitteet	8
2.2.1 Golden Engineering:n laitteet	8
2.2.2 Teledyne ICM:n laitteet	9
3 PULSSIMUOTOISEN RÖNTGENSÄTEILYN MITTAAMINEN	10
3.1 Yleiskatsaus pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamiseen	10
3.2 Mittauksia pulssiröntgenlaitteilla	11
3.2.1 Laitevalmistajan mittaukset ja suositukset	11
3.2.2 Muiden toimijoiden tekemät mittaukset	11
3.2.3 STUKin Dosimetrialaboratoriossa XRS3-laitteella tehdyt mittaukset	12
3.2.4 Pulssiröntgensäteilyn mittaamiseen soveltuvat kaupalliset mittarit	17
4 PULSSIRÖNTGENLAITTEIDEN KÄYTTÖ SUOMESSA	18
5 SÄÄNNÖKSET	19
5.1 Suomi	19
5.2 Muut Pohjoismaat	19
5.2.1 Ruotsi	19
5.2.2 Norja	20
5.2.3 Tanska	20
5.2.4 Islanti	20
5.3 Yhteenveto säännöksistä Pohjoismaissa	21
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	22
6.1 Yhteenveto	22
6.2 Ehdotuksia vaatimuksiksi pulssiröntgenlaitteiden käyttöön	23
7 KIRJALLISUUSVIITTEET	24

1 Johdanto

Pulssiröntgenlaitteet ovat pienitehoisia, usein akkukäyttöisiä, pulssimuotoista röntgensäteilyä tuottavia läpivalaisulaitteita. Laitteita on käytössä viranomaisilla sekä toiminnanharjoittajilla. Tyypillisiä käyttökohteita pulssiröntgenlaitteille ovat esimerkiksi kiinteistöjen putkistojen kuvaukset sekä erilaiset teollisuuden sovellutukset, joissa tehdään ainetta rikkomattomia tutkimuksia. Pulssiröntgenlaitteiden käyttö on rinnastettavissa teollisuusradiografiaan ja tällä hetkellä niiden käyttöä säännellään Suomessa soveltuvien ohjeiden ST 5.6 mukaisesti. Pulssimuotoista röntgensäteilyä käytetään myös lääketieteen sovelluksissa, mutta tässä raportissa keskitytään ainoastaan teollisuus- ja tutkimuskäytössä oleviin pulssiröntgenlaitteisiin. Tarkoituksena on selvittää pulssiröntgenlaitteiden käyttöä Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. Lisäksi selvitetään pulssiröntgensäteilyn mittaamista ja esitetään mittaustuloksia kyseisistä laitteista mahdollisesti saatavalle säteilyannokselle.

2 Pulssiröntgenlaitteiden käyttö teollisuudessa ja tutkimuksessa

Teollisuus- ja tutkimuskäytössä olevat pulssiröntgenlaitteet ovat pienitehoisia (< 400 kVP) laitteita, jotka tuottavat pulssimuotoista röntgensäteilyä. Laitteet ovat tyypillisesti akkukäyttöisiä, kevyitä (< 10 kg) ja helposti liikuteltavissa paikasta toiseen. Laitteeseen kuuluu erillinen röntgenlaite sekä kuvalevy, joita voi olla erilaisia (esim. digitaalinen kuvauslevy tai filmi). Pulssinleveys on tyypillisesti jotakin kymmeniä nanosekunteja (esim. 50 ns). Teollisuuskäytössä olevien laitteiden pulssinleveys on useita kertaluokkia pienempi kuin terveydenhuollossa käytössä olevilla laitteilla. Teollisuuskäytössä olevien pulssiröntgenlaitteiden läpäisyvyvyys on suurimmillaan joitakin senttejä teräksessä. Laitteet eivät tarvitse erillistä lämmitysaikaa, jonka tavanomaiset röntgenlaitteet vaativat, mikä tekee pulssiröntgenlaitteiden käytöstä nopeaa. Laitteista saatava säteilyannos on myös pieni verrattuna tavanomaisiin röntgenlaitteisiin, mikä osaltaan tekee niistä turvallisempia käyttää.

2.1 Käyttökohteet

Pulssiröntgenlaitteille on useita erilaisia käyttösovelluksia. Tyypillisimmin laitteet ovat käytössä eri viranomaisilla (esim. poliisi, puolustusvoimat, tulli ja (lentokenttien) turvallisuusviranomaiset). Laitteita käytetään mm. räjähteiden ja salakuljetettujen tavaroiden etsimiseen. Laitteita käytetään myös rikostekniseen (esim. luotien palaset) ja palotekniseen (tulipalojen syttymissyyt) tutkintaan sekä suojelutarkoituksissa (esim. maa-aluekartoitus tärkeiden henkilöiden suojauksessa). Teollisuudessa laitteita käytetään NDT-tutkintaan (non-destructive testing), jolloin voidaan kuvata erilaisia teollisuuden kohteita niitä rikkomatta. Tällaisia ovat esimerkiksi hitsausseamujen tarkastus, putkistojen kuntokartoitus sekä laivojen ja lentokoneiden rakennus ja tarkastus. Laitteita käytetään myös rakennusten tutkimuksiin (vahinkokartoitus, historialliset kohteet), eläinten kuvaamiseen (eläinlääkärit, eläinten suojelu) sekä ruuan ja taiteen kuvaamiseen. Käyttökohteiden ja sovellustusten määrä lisääntyy vuosien varrella.

2.2 Suomessa käytössä olevat laitteet

Suomessa oli käytössä alkuvuodesta 2017 noin sata akkukäyttöistä pulssiröntgenlaitetta. Näistä laitteista lähes kaikki olivat Golden Engineering Inc. -yhtiön valmistamia. Lisäksi käytössä oli joitakin Teledyne ICM -yhtiön kannettavia CP120B-laitteita, joita käytetään samantapaisissa sovelluksissa kuin pulssiröntgenlaitteita, vaikka ne lähettävätkin jatkuvamuotoista säteilyä.

2.2.1 Golden Engineering:n laitteet

Golden Engineering Inc. -yhtiö on keskittynyt kevyiden helposti siirrettävien akkukäyttöisten röntgenlaitteiden suunnitteluun ja valmistamiseen. Laitteiden mallit ovat XR150, XR200, XRS-3 ja XRS-4. Yhtiön valmistamia laitteita on Suomessa käytössä useita, näistä suurin osa on XR200- tai XRS-3-mallisia. Maaliskuussa 2017 Suomessa otettiin käyttöön ensimmäinen XRS-4-laite.

XR150- ja XR200-laitteiden teho on 150 kVP ja läpäisyvyvyys noin 1,3 cm (1/2 tuumaa) teräksessä. XR150-laitteen pulssinleveys on 50 nanosekuntia ja XR200-laitteen 60 nanosekuntia. XRS-3-laitteen teho on puolestaan 270 kVP ja läpäisyvyvyys noin 2,5 cm (1 tuuma) teräksessä. XRS-3-laitteen pulssinleveys on 60 nanosekuntia. XRS-4-laite on mallisarjan tehokkain laite (370 kVP, läpäisyvyvyys noin 3,8 cm (1,5 tuumaa)). (Golden Engineering, Inc. 2016a) Uusimmissa laitteissa pulssinleveydet voivat olla pienempiä kuin aiemmissa vastaavan mallin laitteissa.

2.2.2 Teledyne ICM:n laitteet

Myös Teledyne ICM -yhtiö on keskittynyt kannettavien akkukäyttöisten röntgenlaitteiden kehittämiseen, valmistamiseen ja markkinointiin. Laitteita on useita eri malleja ja tyyppisiä. Esimerkiksi CP120B-laite on pieni (7 kg) helposti kannettava laite, jonka putkijännite on 40–120 kV (virta vastaavasti 0,1–1 mA). Suurin yhtäjaksoinen käyttöaika laitteelle on 300 sekuntia. (Teledyne ICM 2016) Laitteet toimivat jatkuvalla jännitteellä, eivätkä ne siis ole pulssiröntgenlaitteita. Kevyimpiä malleja mainostetaan pulssiröntgenlaitteiden mahdollisina korvaajina, sillä niiden mahdollinen käyttö-/kuvausaika on pidempi kuin tavanomaisten pulssiröntgenlaitteiden.

3 Pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaaminen

3.1 Yleiskatsaus pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamiseen

Säteilysuojelussa käytettävien mittareiden tulisi pystyä mittaamaan säteilyä laajalla skaalalla. Mittareilla pitäisi pystyä erottamaan pieniä luonnon taustasäteilystä poikkeavia annosnopeuksia, kun taas toisaalta säteilykeilassa tai onnettomuuden aikana annosnopeus voi olla hyvinkin suuri. Näin ollen mittareilta vaaditaan laajaa annosnopeuden mittausaluetta.

Pulssiröntgenlaitteista saatavan säteilyannoksen/annosnopeuden mittaaminen on vaikeampaa kuin tavanomaisen röntgensäteilyn mittaaminen. Tämä johtuu säteilyn lyhyestä pulssista, minkä vuoksi tavanomaiset säteilymittarit eivät yleensä joko havaitse pulssia ollenkaan tai antavat väärän annoksen/annosnopeuden (liian suuren tai pienen). Useimpien julkaisujen mukaan harvat mittarit pystyvät mittaamaan luotettavasti pulssista röntgensäteilyä, esim. (Ankerhold et al. 2009, Gotz et al. 2015).

Useimmiten parhaiten soveltuvina mittareina pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamiseen pidetään ionisaatioon perustuvia mittareita (ionisaatiokammiot ja paineionisaatiokammiot). Näidenkin kohdalla on huomioitava mahdollinen rekombinaatiovaikutus ja ilmaisimen satureituminen mitattavasta annosnopeudesta ja keräysjännitteestä riippuen. Lisäksi ionisaatiokammioiden tuottama virta on suurellakin annosnopeudella pieni, jolloin muun mittarissa käytettävän elektroniikan on oltava korkealaatuista, jotta mittaus-tulos on luotettava. (Ankerhold et al. 2009)

Käytettäessä pulssien laskemiseen perustuvia mittareita ("counting detectors", esim. GM-putki, verrannollisuuslaskuri) voi signaalin kasautuminen ("pile-up") suuressa annosnopeudessa johtaa liian pieneen mitattuun arvoon. Mittareiden kuollut aika ("dead time") on usein pidempi kuin mitattavan pulssin kesto (kuollut aika on tyypillisesti millisekunteja (ms), kun taas pulssi on nanosekunteja (ns)), jolloin pulssia ei välttämättä havaita ollenkaan. Jos mittareissa käytetään kuolleen ajan kompensointia algoritmia, joka olettaa säteilyn jatkuvaksi, epäonnistuu todellisen arvon mittaaminen. Lisäksi joissakin mittareissa (erityisesti aktiivisissa henkilökohtaisissa dosimetreissa) on käytössä alhaisen annosnopeuden arvoilla energiansäästökäytännöitä, jotka voivat myös aiheuttaa pulssin mittaamisen epäonnistumisen. Energiansäästökäytännön ollessa käytössä laite mittaa vain osan ajasta (esimerkiksi 10 %) ja on muun ajan pois päältä, jolloin se ei välttämättä havaitse pulssia ollenkaan. (Ankerhold et al. 2009)

Kaiken kaikkiaan mittarivalinnassa pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamiseen on oltava huolellinen ja huomioitava ilmaisintyyppi, käytettävän elektroniikan laatu, mitattavan säteilyn ominaisuudet – erityisesti pulssinkesto ja annosnopeus, jotta mittaus-tulos on luotettava. (Ankerhold et al. 2009, Ambrosi et al. 2010, Zutz et al. 2012, Gotz et al. 2015, Friedrich & Hupe 2016) Yleisesti ottaen pulssiröntgenlaittevalmistajat suosittelevat laitteiden käyttäjiä käyttämään henkilökohtaisia dosimetreja, kuten TLD-dosimetria (Golden Engineering Inc 2016b). Dosimetrit ovatkin osoittautuneet luotettaviksi tekniikoiksi pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamisessa. (Ankerhold et al. 2009, Zutz & Hupe 2013)

Teollisuus- ja tutkimuskäytössä tyypillisten pulssiröntgenlaitteiden tuottaman pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamisesta on julkaistu joitakin tieteellisiä artikkeleita

(Ankerhold et al. 2009, Zutz et al. 2012, Gotz et al. 2015). Lisäksi tämän raportin tekemistä varten on ollut käytössä pulssiröntgenlaitetta käyttävän toiminnanharjoittajan (Latvala 2013) tekemä mittausraportti sekä joitakin Säteilyturvakeskuksen (STUK) tarkastajien tekemiä mittauksia pulssiröntgenlaitteilla. Näiden mittaustulokset on referoitu myöhemmin.

Käytettävissä olevien mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että käytössä olleiden säteilymittareiden mittauskapasiteetti ei riitä pulssiröntgensäteilyn annosnopeuden mittaamiseen lyhyillä etäisyyksillä johtuen lyhyestä pulssinkestosta ja suurista annosnopeuksista. Lyhyillä etäisyyksillä dosimetrit ovat luotettavin tapa mitata säteilyannosta. Passiivisten dosimetricien (esim. TLD) ongelma on kuitenkin niiden luenta (ts. tulos ei ole heti käytettävissä), jolloin ne eivät sovellu esimerkiksi aluerajauksiin tai niiden avulla ei saada välittömästi tietoa mahdollisesta onnettomuudesta. Suuremmilla etäisyyksillä annosnopeusmittauksia oli tehty ainoastaan Inspectan raportissa (Latvala 2013), mutta raportin mukaan mittareiden kapasiteetti ei kuitenkaan riittänyt valvonta-alueen määrittelyyn annosnopeuden perusteella.

Käytännössä pulssiröntgenlaitteita käytettäessä säteilyturvallisuus toteutuu hyvin, jos käytetään laitevalmistajan ohjeiden mukaisia suoja-alueita. Suoja-alue 270 kVp:n XRS-3-laitteelle on 30 metriä laitteen eteen, 3 metriä laitteen taakse ja 11 metriä kummallekin sivulle. Laitevalmistajan ilmoittamalla teoreettisella maksimipulssimäärällä 3 000 pulssia/tunti 30 metrin etäisyydellä laitteesta ylitetään Suomen säädösten mukainen tarkkailualueen annosnopeusraja 7,5 $\mu\text{Sv/h}$. Laitteiden käyttäjien mukaan todellinen maksimipulssimäärä on kuitenkin 1 000 pulssia/tunti, jolloin 7,5 $\mu\text{Sv/h}$ ei ylity 30 m etäisyydellä laitteesta. Näin ollen annosnopeusrajat ylittyvät teoriassa, mutta eivät käytännössä.

3.2 Mittauksia pulssiröntgenlaitteilla

3.2.1 Laitevalmistajan mittaukset ja suositukset

Laitevalmistaja on tehnyt mittauksia käyttäen XR200-laitetta ja (150 kV) Victoreen 660-mittaria, johon on yhdistetty 660-5-anturi (Golden Engineering Inc 2017a). Näissä mittauksissa laitevalmistaja ilmoittaa yhdestä pulssista saatavan annoksen olevan 37 μSv (4 mR) suoraan laitteen keilassa 30,5 cm (12 tuumaa) päässä laitteesta. Laitteen vieressä vastaavasti annos on 0,018 μSv (0,002 mR) ja takana 0,14 μSv (0,015 mR). Näistä annosmittauksista 30,5 cm päässä laitteesta valmistaja on laskenut annokset suuremmilla etäisyyksillä. Lisäksi valmistajan sivuilta on löydettävissä annos-/vuototaulukko eri laitemalleille (Golden Engineering Inc 2017b). Taulukosta voidaan havaita, että taaksepäin tuleva ja sivuttaissuuntainen vuoto on alle 0,5 % annoksesta, jonka saa vastaavalla etäisyydellä suoraan keilan edessä. Valmistaja ei ilmoita mittauksilleen epävarmuutta eikä millä mittarilla se on mitattu.

Laitevalmistaja (Golden Engineering Inc 2016b) suosittelee 270 kVp:n XRS-3 -laitteelle suojaetäisyydeksi vapaassa tilassa 30 metriä laitteen eteen, 3 metriä laitteen taakse ja 11 metriä kummallekin sivulle. Tällöin 3 000 pulssia/tunti aiheuttama noin 20 μSv (2 mR) annos jää kyseisen suoja-alueen sisään. 3 000 pulssia tunnissa on teoreettinen maksimipulssimäärä laitteelle. Laitevalmistajan mukaan yhdestä pulssista saatava annos 30 cm päässä laitteesta on 26–40 μSv . Lisäksi laitteesta saattaa aiheutua vuotosäteilyä, joka on 100 pulssille korkeintaan 240 μSv laitteen sivulla 7,6 cm (3 tuuman) päässä laitteesta ja < 20 μSv 5 cm (2 tuuman) päässä laitteen takana.

3.2.2 Muiden toimijoiden tekemät mittaukset

Ankerhold et al. (Ankerhold et al. 2009) mittasivat XR200 -laitteella (Golden Engineering Inc 2016a) tuotettua pulssista röntgensäteilyä usealla erilaisella mittarilla. Käytettyjen

pulssien määrä oli 99 ja etäisyys 1,3–1,4 m. Artikkelin kirjoittajat eivät kerro, mitä laitteita mittauksessa käytettiin, mutta toteavat, että yksikään laitteista ei soveltunut kunnolla pulssiröntgensäteilyn mittaamiseen. Referenssimittarilla yhden pulssin tuottamaksi annokseksi saatiin 1,55 μSv ja passiivisella mittarilla samalla etäisyydellä saatiin annokseksi 1,14 μSv .

Gotz et al. (Gotz et al. 2015) mittasivat lineaarisella elektronikiihdyttimellä tuotettua pulssista röntgensäteilyä kolmella eri mittarilla (RamION-ionisaatiokammio, LB 1236-H -verrannollisuuslaskuri ja 6150AD-b-tuikeilmaisin). Käytetty pulssijakso oli 77 ns ja etäisyys laitteesta noin metri. Käytetyistä mittareista ainoastaan RamION (RTUTec 2016) pystyi mittaamaan pulssimuotoista röntgensäteilyä sen valmistajan ilmoittamien spesifikaatioiden puitteissa. Kahdella muulla mittarilla mittaukset eivät onnistuneet luotettavasti.

Inspectan mittausraportissa on altistettu TLD-dosimetrejä pulssimuotoiselle röntgensäteilylle XRS-3-laitteella. (Latvala 2013) Säteilytysetäisyydet olivat 1, 2 ja 3 metriä ja käytetty pulssimäärä oli 100 pulssia. Lisäksi annosnopeutta ja kertynyttä annosta mitattiin GM-mittarilla (Rados RD-200), paineionisaatiokammioilla (Victoreen 451P) ja puolijohdeperusteisella säteilyhälyttimellä (Bleper SV). Syväannokset dosimetreissä olivat 1 m – 436 μSv , 2 m – 108 μSv ja 3 m – 54 μSv . Näistä mittaustuloksista voidaan extrapoloida 30 m etäisyydelle 3 000 pulssia/tunti annokseksi < 15 μSv , mikä on yhteneväinen valmistajan suositusten kanssa. Raportin mukaan laitteen käytännön maksimi on kuitenkin 990 pulssia/tunnissa, jolloin annokseksi 30 m etäisyydellä saadaan 4,85 μSv . Mittausraportin mukaan millään käytetyistä säteilymittareista reagointinopeus ei riittänyt eristettävän valvonta-alueen määrittelyyn annosnopeuden perustella.

STUKin tarkastajat ovat mitanneet joissakin tarkastuksissa XR150- ja XR200-laitteista saatavaa pulssimuotoista röntgensäteilyä Victoreen 451P -mittarilla. Esimerkiksi XR200-laitteen aiheuttamaa säteilyannosta mitattiin laitteen säteilykeilassa käyttäen 99 pulssia. Mittaustulokset (1–2 mittausta) olivat: 0,3 m – 63 μSv , 1 m – 73,5 μSv , 2 m – 50 μSv ja 5 m – 6,6 μSv . Tarkasteltaessa tuloksia ja verrattaessa tuloksia Inspectan mittauksiin on havaittavissa, että tämän paineionisaatiokammion mittauskapasiteetti ei riitä lyhyemmillä etäisyyksillä (0,3 m tulos pienempi kuin 1 m:n tulos,). Sen sijaan suuremmilla etäisyyksillä mittaustulokset vastaavat paremmin muita, esimerkiksi Inspectan, mittauksia.

Yllämainittujen lisäksi Zutz ja Hupe (Zutz & Hupe 2013) ovat mitanneet XR200-laitteella tuotettua pulssiröntgensäteilyä DIS-1-dosimetreillä (Mirion Technologies 2016). Mittauksia tehtiin eri etäisyyksillä (0,2; 0,3 ja 1 m) sekä eri pulssimäärillä. Mittauksissa DIS-1-dosimetreillä saadut tulokset olivat verrannollisia keskenään (ei riippuvuutta paikasta ts. pulssin annosnopeudesta). Tulokset kuitenkin erosivat jonkin verran käytetystä sekundääristandardista, mutta ero johtunee osittain DIS-1-dosimetrien energiariippuvuudesta, jota ei korjattu XR200-laitteelle. Kaikkiaan kirjoittajat totesivat DIS-1-dosimetrien soveltuvan pulssiröntgensäteilyn mittaamiseen annettujen rajojen puitteissa. Käytetyllä sekundääristandardilla annokseksi 1 m etäisyydellä saadaan $H_p(10) = 3,2 \pm 0,2 \mu\text{Sv}$. Lisäksi laitteen spektrimittauksissa havaitaan, että laitteen maksimienergia on lähellä 150 kV, mutta keskimääräinen energia on pienempi.

3.2.3 STUKin Dosimetrialaboratoriossa XRS3-laitteella tehdyt mittaukset

STUKiin lainattiin syksyllä 2016 Golden Engineeringin XRS-3-laite, jonka lähettämää pulssimuotoista säteilyä mitattiin Dosimetrialaboratoriossa. XRS-3-laitteen lähettämää säteilyä mitattiin usealla eri mittarilla. Referenssimittarina käytettiin Dosimetrialaboratorion mittanormaalia NE2575C (sno 547), joka on kalibroitu PTB:llä (9.12.2014) eri röntgensäteilylaaduille. Lisäksi mittauksissa käytettiin DIS-dosimetrejä (Mirion), Victoreen 451P- (Fluke Biomedical) ja Accu-Gold+- (RadCal) mittareita. Mittauksia tehtiin eri etäisyyksillä

sekä sivuttaissuunnassa eri kulmissa ja laitteen takana. Mittaustuloksista ei ole vähennetty taustasäteilyä, sillä se arvioitiin merkityksettömäksi niissä mittauspisteissä, joissa luotettavia mittauksia pystyttiin tekemään.

Mittauksissa jouduttiin tekemään runsaasti approksimaatioita, sillä XRS3-laitteen lähettämän röntgensäteilyn spektriä ei tunnettu tarkasti. Approksimaatioita varten käytettiin laitteen valmistajan ilmoittamaa maksimienergiaa 270 kVp ja oletettiin spektrimuodon olevan samankaltainen kuin ISO Narrow laaduilla (ISO-4037-1:1996). Mittanormaalilla NE2575C (547) mitattaessa säteilylaadusta johtuva korjauskerroin k_Q oletettiin 0,9:ksi maksimienergiaa lähellä olevien röntgensäteilylaatuojen (ISON-200, ISON-250 ja ISON-300, k_Q :t 0,88–0,93) perusteella. Mittaustuloksena saatu ilma-kerma-arvo (Gy) muutettiin annokseksi (Sv) annosmuunnoskerrointa (1,5) käyttäen. Annosmuunnoskerroin arvioitiin vastaavasti maksimienergiaa lähellä olevien röntgensäteilylaatuojen perusteella. Mittanormaalille NE2575C (547) ei tehty korjausta rekombinaation suhteen, koska rekombinaatio todettiin mittauksin merkityksettömäksi suhteessa muuhun mittauksissa esiintyneeseen vaihteluun. Mittanormaalilla mitatut tulokset on esitetty perusoloissa NTP (20 °C, 101,325 kPa, 40 % RH).

Muilla mittareilla mittareiden kalibroitikerrointa ei huomioitu laskennassa, koska säteilyn spektriä ei tunneta tarkasti. Kokonaisuutena mittareiden kalibroitikertoimien vaihtelu ja poikkeama arvosta 1 ovat kuitenkin niin pieniä, että kalibroitikertoimen huomiotta jättäminen aiheuttaa vain pienen virheen tuloksiin. Olosuhteita ei myöskään ole korjattu perusolosuhteisiin.

Kaiken kaikkiaan mittausten epävarmuus on suuri (noin 50 %), joten mittaustuloksia voi pitää vain suuntaa-antavina. Suuresta epävarmuudesta huolimatta mittaustulokset on esitetty kuvissa usealla merkitsevällä numerolla, jotta voidaan havainnollistaa säteilyn vaimentuminen etäisyyden ja kulman muuttuessa.

Lineaarisuus ja toistettavuus pulssimäärän suhteen

Suurin osa mittauksista on tehty käyttämällä laitteen maksimipulssimäärää (99), josta on laskettu annos yhdessä pulssissa (keskiarvo useammasta mittauksesta). Mittauksia tehtiin myös eri pulssimäärillä (10, 20, 50, 75, 99), jolloin voitiin todeta annos/pulssi-suhteen olevan hyvin lähellä lineaarista eri pulssimäärillä.

Mittauksia myös toistettiin useampana päivänä samoilla asetuksilla. Näissä toistoissa havaittiin, että yhdestä pulssista saatava annos vaihteli eri mittauskertojen välillä. Max/min-suhde näistä mittauksista oli 1,14 ja keskihajonta/keskiarvo-suhde 5 %. Tähän voi vaikuttaa esimerkiksi akun erilainen varausaste.

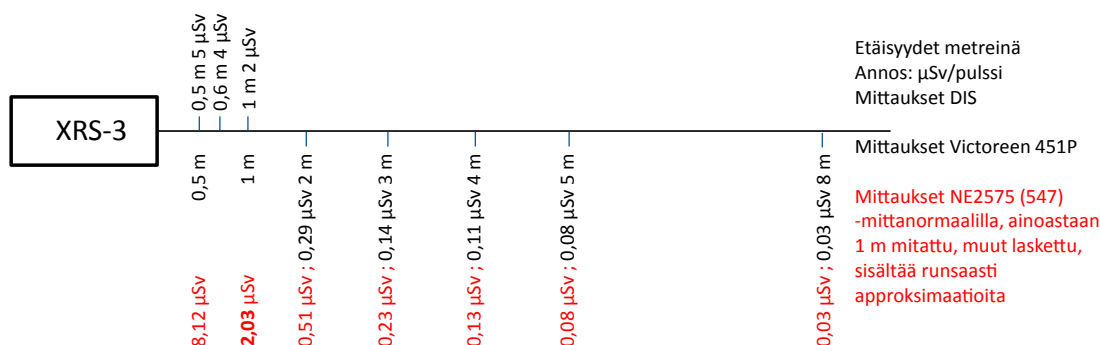
Annos suhteessa etäisyyteen

Kuvassa 1 on esitetty annos (μSv), joka saadaan yhdestä XRS-3-laitteen lähettämästä pulssista. Mittanormaalilla NE2575C (547) on mitattu ainoastaan tulos 1 m etäisyydellä, josta muut tulokset on laskettu kääntäen verrannollisena etäisyyden neliöön. Tuloksista havaittiin, että DIS-dosimetreillä mittaukset olivat luotettavia noin 1 metrin päässä laitteesta ja sitä lähempänä. Etäisyyden kasvaessa mittaustulosten hajonta kasvoi huomattavan suureksi suhteessa mitattuun annokseen. Yli 2 m etäisyydellä laitteesta DIS-dosimetreillä havaittu annos oli hyvin pieni ja näitä mittauksia ei voidakaan pitää luotettavina annosarvion kannalta. Victoreen 451P -mittari puolestaan satureitui lyhyillä etäisyyksillä (< 1,5 m) suuresta annosnopeudesta johtuen. Pidemmällä etäisyyksillä ($\geq 1,5$ m) mittarin mittaama annos vaikutti luotettavalta, kun taas annosnopeusmittaukseen ei voinut luottaa pidemmälläkään etäisyyksillä. Accu-Gold+ -mittarilla mitattujen tulosten perusteella lasketut arvioidut annokset olivat: 1 m etäisyydellä 1,5 μSv ja 2 m etäisyydellä 0,4 μSv . Näiden voidaan todeta sopivan hyvin muuhun mittausdataan. Accu-Gold+ -mit-

tarilla mitattaessa voitiin myös arvioida mitattavan säteilyn ominaisuuksia. Näissä mitauksissa laitteen tehoksi saatiin 160 kVp, joka on todennäköisesti laitteen keskimääräinen teho (vrt. Zutz & Hupe 2013). Asian selville saamiseksi säteilyn spektri tulisi mitata spektrometrillä. Spektrimittaus mahdollistaisi myös tarkemman säteilyn laatutekijän ja annosmuunnoskertoimen arvioimisen. On myös mahdollista, että kyseisen laitteen röntgenputki on voinut hiipua vuosien kuluessa (laite on noin 10 vuotta vanha). Jos laitteen röntgenputki on hiipunut, on mahdollista, että uudella laitteella saatavat annokset ovat jonkin verran suurempia kuin nyt mitatut.

Kaikkiaan voitaneen todeta, että mittaustuloksissa on hajontaa mittarista riippuen eikä esimerkiksi Victoreen 451P -mittarilla mitatut tulokset noudata täysin säteilyn vaimentumista suhteessa etäisyyden neliöön. Kuitenkin ottaen huomioon mittauksille annetun epävarmuuden voidaan todeta, että kyseisillä mittareilla kyetään mittaamaan XRS3-laitteen tuottamaa pulssimuotoisen röntgensäteilyn aiheuttamaa annosta, kunhan huomioidaan mittareiden rajoitukset etäisyyden suhteen. Mittareilla saadut tulokset ovat keskenään yhteneväiset mittausten epävarmuus huomioiden.

Havaitaan myös, että tulokset ovat linjassa aiemmin esitettyjen mittaustulosten kanssa. XR200-laitetta käytettäessä Ankerhold et al. mukaan annos on 1,55 μSv 1,3–1,4 m etäisyydellä (Ankerhold et al. 2009) ja Zutz & Hupen mukaan 1 m etäisyydellä $H_p(10)$ on $3,2 \pm 0,2 \mu\text{Sv}$ (Zutz & Hupe 2013). Valmistajan ilmoittamat annokset ovat XR200-laitteella 37 μSv 30,5 cm päässä laitteesta ja vastaavasti XRS-3-laitteella 26–40 μSv (Golden Engineering Inc 2016 ja 2017a). Laboratorion mittanormaalilla mitattu annos olisi 30,5 cm etäisyydellä 22 μSv eli hiukan pienempi kuin valmistajan ilmoittama annos. Lukujen tarkka vertailu ei ole mahdollista, sillä valmistajan TLD-mittausten epävarmuutta ei tunneta ja laboratoriossa tehdyt mittaukset sisältävät runsaasti approksimaatioita. STUKin tarkastuksilla tehdyistä mittauksista suuremmilla etäisyyksillä saadut tulokset vastaavat hyvin laboratoriossa saatuja tuloksia (2 m – 0,51 $\mu\text{Sv/pulssi}$ ja 5 m – 0,067 $\mu\text{Sv/pulssi}$). Inspectan TLD:lla tekemissä mittauksissa (Latvala 2013) annos/pulssi on 4,4 μSv 1 m etäisyydellä, mikä on suurin mitattu annos kyseisellä laitteella. Lisäksi Tanskan säteilyturvaviranomaiset ovat tehneet mittauksia vastaavalla laitteella (XRS-3), ionisaatiokammiolla, TLD:llä ja Victoreen 451 -mittarilla annosnopeusmoodissa (Kaidin Frederiksen 2017). Mittauksissa havaittiin, että ko. mittarit korreloivat hyvin keskenään, kunhan etäisyyden aiheuttamat rajoitukset otettiin huomioon. Tanskalaisten mittauksissa saamat tulokset ovat noin 1,7 kertaa suurempia kuin näissä mittauksissa saadut tulokset, jos ne muutettaisiin annosnopeudeksi. Annosnopeusmittaukset eivät kuitenkaan ole kokonaisuudessaan niin luotettavia kuin annokseen perustuvat mittaukset. Eroa näissä mittauksissa saatuihin tuloksiin voi osittain selittää käytetyn pulssiröntgenlaitteen ikä ja käyttömäärät (tässä käytetty laite vanhempi).



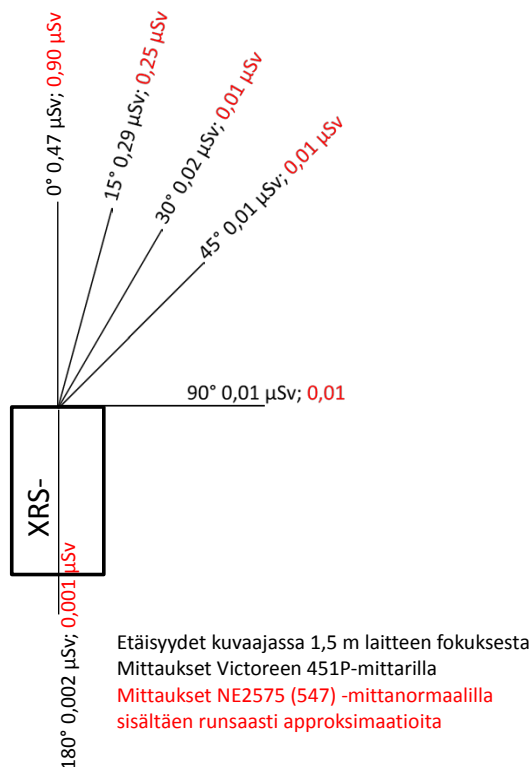
Kuva 1. Pulssiröntgenlaitteesta saatava annos $\mu\text{Sv/pulssi}$ suhteessa etäisyyteen. Mittanormaalilla on mitattu ainoastaan 1 m, josta muut on laskettu ($\sim 1/r^2$). Mittanormaalilla mitatut tulokset (Gy) on muutettu annokseksi (Sv) annosmuunnoskertoimella 1,5, joka on arvioitu.

Annos suhteessa mittauskulmaan

XRS3-laitteen sivuilleen tuottamaa annosta arvioitiin tekemällä mittauksia laitteen sivulla ja takana. Tulokset on esitetty kuvassa 2. Mittanormaalilla NE2575C (547) mittaukset tehtiin 1 m etäisyydellä, josta tulokset laskettiin 1,5 m etäisyydelle. Mitatut tulokset muutettiin annokseksi vastaavasti kuin aiemmin. Laitteen säteilykeilan leveys on noin 20° , jolloin mitattu annos 30° keilan keskilinjasta sivuun on huomattavasti pienempi kuin annos 15° keskilinjasta sivuun kuten tuloksista voidaan havaita. Mittaukset Victoreen 451P -mittarilla tehtiin 1,5 m etäisyydellä. Tuloksista havaitaan, että mittaustulokset ovat keskenään yhteneväiset mittausten epävarmuus huomioiden.

Valmistaja ilmoittaa XR200-laitteelle annokseksi kohtisuoraan sivulla $0,018 \mu\text{Sv}$ 30,5 cm päässä laitteesta ja takana $0,14 \mu\text{Sv}$ vastaavasti (Golden Engineering Inc 2017a). Mittanormaalilla mitattuna vastaavat annokset olisivat $0,16 \mu\text{Sv}$ ja $0,03 \mu\text{Sv}$, jotka poikkeavat jonkin verran valmistajan ilmoittamista tuloksista. Valmistajan annos-/vuoto- taulukosta (Golden Engineering Inc 2017b) havaitaan, että valmistajan mukaan XRS-3 -laitteella sivuttaissuuntainen vuoto on noin kahdeksan kertaa suurempi kuin XR200-laitteella, jolloin sivuttaissuuntaiset mittaukset olisivat keskenään samaa suuruusluokkaa. Valmistajan ilmoituksen mukaan XR200-laitteella takana saatava annos on suurempi kuin sivulla, XRS-3-laitteella puolestaan päinvastoin (sivulla noin 2,5 kertaa suurempi kuin takana). Nyt mitatut tulokset ovat samansuuntaiset XRS-3-laitteelle sivuttaissuuntaisen annoksen ollessa suurempi kuin takana olevan.

Kulmamittaustuloksista voidaan laskea, kuinka monesta pulssista tai kuvasta saadaan tietty annos. Laskelma on esitetty taulukossa 1. Taulukosta havaitaan, että saadaksesi 1 mSv annoksen (väestön annosraja), täytyy saada 1 100 pulssia suoraan laitteen edessä 1,5 m etäisyydellä. Jos yksi kuva koostuu 20 pulssissa, tämä tarkoittaisi 55:tä erillistä kuvaa kyseisellä etäisyydellä.



Kuva 2. Pulssiröntgenlaitteesta saatava annos μSv/pulssi eri kulmissa. Mittanormaalilla ilmaker-
mamittaukset tehtiin 1 m etäisyydellä, josta 1,5 m etäisyys on laskettu. Mittanormaalilla mitatut
tulokset (Gy) on muutettu annokseksi (Sv) annosmuunnoskerroimella 1,5, joka on arvioitu.

Yhteenvedo mittauksista

Yhteenvetona mittaustuloksista voidaan todeta, että eri mittareilla pystyttiin mittaamaan XRS3-laitteen tuottaman pulssimuotoisen röntgensäteilyn aiheuttama annos etäisyyden aiheuttamat reunaehdot huomioiden. Eri mittareilla mitatut annokset olivat yhteneviä keskenään mittausepävarmuuden puitteissa. Lisäksi tulokset ovat yhteneviä tieteellisten julkaisujen, valmistajan ja Inspectan raportissa ilmoitettujen annosarvioiden kanssa. Annosmittaustuloksista voidaan tehdä annosarvio, josta voidaan arvioida pulssiröntgen-laitteen haitallisuutta. Annosnopeusmittaus ei ole luotettavaa.

Kyseiset mittaukset on tehty vain yhdellä laitteella. Luotettavampien mittaustulosten saamiseksi laitteen spektri tulisi mitata spektrometrillä, jotta säteilylaatukerroin ja annosmuunnoskerroin voitaisiin arvioida tarkemmin. Lisäksi luotettavan tuloksen saamiseksi tulisi mitata annoksia myös toisella vastaavalla laitteella, jotta voitaisiin arvioida, onko esimerkiksi laitteen iällä vaikutusta laitteen lähettämän säteilyn annosnopeuteen ja energiajakaumaan ja sitä kautta siitä saataviin annoksiin.

Taulukko 1. Tarvittavien pulssien/kuvien lukumäärä (noin) 1 mSv annoksen saamiseksi.

Sijainti 1,5 m laitteen fokuksesta	Pulssien lukumäärä, joista kertyy annosta 1 mSv	Kuvien lukumäärä, joista kertyy annosta 1 mSv (20 pulssia per kuva)
Edessä	1 100	55
15°	4 000	200
30°	92 000	4 600
45°	102 000	5 100
90°	155 000	7 800
Takana	750 000	38 000

3.2.4 Pulssiröntgensäteilyn mittaamiseen soveltuvat kaupalliset mittarit

Dosimetrien lisäksi markkinoilla on tällä hetkellä saatavissa joitakin säteilymittareita, jotka valmistajiensa mukaan soveltuvat pulssiröntgensäteilyn mittaamiseen. Joitakin tällaisia mittareita on esitelty alla.

TBM-IC-Pulse -säteilymittari (Technical Associates 2016) on kevyt, digitaalinen ionisaatiokammioon perustuva mittari, jolla mitattava energia voi vaihdella 2 keV ja 2,5 MeV välillä. Mittarilla voi mitata sekä annosnopeutta että kokonaisannosta, mittaussvälillä 0,1 mSv/h – 1 Sv/h tai 0,01 mSv – 1 Sv. Mitattavan säteilyn pulssinleveys voi vaihdella 20 nanosekunnista jatkuvaan säteilyyn ja näin ollen mittarin pitäisi soveltua myös esimerkiksi XRS-3-laitteelle.

Ludlum 9DP-1 -säteilymittari (Ludlum Measurements Inc 2016) on kevyt, akkukäyttöinen, digitaalinen, ionisaatiokammioon perustuva mittari, jolla mitattavien gamma- ja röntgensäteilyn energia voi olla 25 keV:stä ylöspäin. Mittarilla voi mitata annosnopeutta joko jatkuvasti tai integroivassa moodissa, mittaussvälillä 0 µSv/h – 500 mSv/h. Mitattavan pulssin leveys voi olla 50 nanosekunnista ylöspäin, jolloin mittari soveltuu tyypillisille pulssiröntgenlaitteille.

RAM-ION- ja RAD-ION -mittarit (RTUTec 2016) ovat kevyitä, akkukäyttöisiä, digitaalisia ionisaatiokammioon perustuvia mittareita, jotka on erityisesti suunniteltu pulssiröntgensäteilyn mittaamiseen. Mitattava annosnopeus voi olla 1 µSv/h – 500/1 000 mSv/h ja RAD-ION-laitteella mitattava energiaväli on 20 keV – 2 MeV. RAM-ION-laitteella voi mitata 60 nanosekunnin pulsseja.

Far West Technology Inc:n Pulse Survey Meter 1030 (Far West Technology Inc 2016) on kevyt, akkukäyttöinen ionisaatiokammioon perustuva mittari, joka on suunniteltu pulssimuotoisen säteilyn mittaamiseen. Laitetta voi käyttää sekä annosnopeuden mittaamiseen (0–1 000 mSv/h) että integroivassa moodissa.

Lisäksi markkinoilla on säteilymittareita, jotka on suunniteltu ensisijaisesti lääketieteellisen pulssimuotoisen röntgenaltistuksen mittaamiseen. Tällaisia mittareita valmistaa esimerkiksi PTW, IBA Dosimetry ja Radcal.

Dosimetrit soveltuvat hyvin pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamiseen ja laitevalmistajat suosittelevatkin pulssiröntgenlaitteiden käyttäjiä käyttämään esimerkiksi TLD-dosimetreja. Myös ionisaatiokammioon perustuvat DIS-dosimetrit (Direct Ion Storage) mittaavat pulssimuotoista säteilyä (esimerkiksi Mirionin DIS-dosimetry system (Mirion Technologies 2016, Zutz & Hupe 2013)). DIS-dosimetreja luetaan niiden mukana tulevalle luentalaitteelle, jolloin mittaustulokset saadaan huomattavasti nopeammin kuin perinteisillä TLD-dosimetreilla.

Kokonaisuutena voitaneen todeta, että markkinoilla on kaupallisia mittareita, jotka soveltuvat niiden valmistajien mukaan pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamiseen. Mittarivalinnassa on kuitenkin oltava huolellinen, sillä kaikki säteilymittarit (edes ionisaatiokammion pohjaiset) eivät sovellu pulssimuotoisen röntgensäteilyn mittaamiseen. Osa mainituista kaupallisista mittareista oli markkinoilla Yhdysvalloissa ja ne toimivat näin ollen tyypillisesti Rad/h-moodissa. Lisäksi mittarit ovat aika hintavia. Pulssimuotoisesta röntgensäteilystä saatavaa annosta voi mitata dosimetreilla ja tämä lienee helpoin ja edullisin tapa ko. säteilyn mittaamiseen.

4 Pulssiröntgenlaitteiden käyttö Suomessa

Pulssiröntgenlaitteiden käytön selvittämiseksi pulssiröntgenlaitteiden käyttäjille lähetettiin kevättalvella 2016 kysely laitteiden käytöstä. (STUK 2016) Kyselyssä tiedusteltiin seuraavia asioita:

1. Vastaaajan nimi ja lupatunnus?
2. Mitä laitteita on käytössä ja kuinka monta kappaletta (esim. 2 kpl Golden Engineering XR-200 -laitteita)?
3. Minkälaisissa sovelluksissa pulssiröntgenlaitetta käytetään?
4. Kuinka usein laitetta käytetään (esim. 1 krt/vko, 2 krt/vuosi)?
5. Kuinka kauan laitetta käytetään kerrallaan (esim. 1 h/kerta sisältäen ”jäähdytys-tauot”)?
6. Kuinka monta kuvaa kohteessa tyypillisesti otetaan kerralla?
7. Kuinka monta työntekijää yhden käyttökerran aikana on mukana? Onko kaikilla mukana olevilla koulutus laitteen käyttöön?
8. Pystytäänkö käyttösovelluksissa rajaamaan kuvausalue (valvonta-alue, tarkkailualue) niin, että ulkopuoliset henkilöt eivät pääse ko. alueelle?
9. Onko kuvauksissa työntekijöillä käytössä dosimetrit ja säteilymittarit? Jos on, minkälaiset?
10. Minkäkokoinen alue rajataan tyypillisissä sovelluksissa?
11. Onko kuvauksissa sattunut ”läheltä piti” -tilanteita?
12. Muuta kommentoitavaa aiheesta?

Kyselyn vastausten perusteella havaittiin, että pulssiröntgenlaitteiden käyttömäärät vaihtelevat runsaasti eri käyttäjistä riippuen. Osa toiminnanharjoittajista käyttää pulssiröntgenlaitteita säännöllisesti viikoittain tai jopa päivittäin, kun taas joidenkin käyttäjien kohdalla käyttö on huomattavasti vähäisempää.

Laitteiden pääasiallisia käyttötarkoituksia ovat putkistojen läpivalaisu, korroosiokuvaukset, kunnossapidon tarpeet (hitsien kuvaukset, putkistotukokset), ajoneuvotarkastukset (puomien päät, jalasten jatkosaumat jne.) ynnä muut ainetta rikkomattomat tutkimukset. Putkiston läpivalaisuissa yms. käytössä tyypillinen kuvamäärä on 1–30 kuvaa/kohde. Laitteistoa käyttää yleensä vähintään kaksi henkilöä, joista kummallakin on koulutus laitteen käyttöön. Laitetta käytävillä henkilöillä on käytössään henkilökohtaiset dosimetrit, sillä usein työntekijät tekevät myös muuta säteilytyötä.

Kuvauksissa käytettävä alue pystytään vastaajien mukaan rajamaan hyvin. Aluerajauksena käytetään laitevalmistajan suositusta tai sitä suurempaa aluetta. Olemassa olevia seiniä pystytään myös käyttämään rajauksissa, mutta suoja-alue on tyypillisesti vähintään 10 m. Yleisesti ottaen vastaajat eivät tuo esiin ongelmia laitteiden käyttöön liittyen ja vastausten perusteella säännöllisesti pulssiröntgenlaitteita käytävillä laitteiden käyttö vaikuttaisi olevan hyvin hallinnassa. Todellisista käytännöistä ei saane tietoa kuin tarkastusten yhteydessä ja tällöinkin parhaiten todellisuutta kuvannee mahdolliset yllätystarkastukset.

5 Säännökset

5.1 Suomi

Suomessa pulssiröntgenlaitteiden käyttöä säännellään ohjeen ST 5.6 soveltuvin osin eli kuten teollisuusradiografiassa käytettäviä laitteita (STUK 2012). Laitteiden käyttöön vaaditaan lupa ja lähtökohtaisesti vaaditaan mm. säteilymittarin käyttöä ja aluerajauksia. Ohjeessa ei ole tällä hetkellä erityismainintoja pulssiröntgenlaitteiden käytöstä.

Teollisuuden toiminnanharjoittajille, joilla on käytössään pulssiröntgenlaitteita, STUK on lähettänyt 24.3.2015 päivätyn kirjeen, jossa täsmennetään toimitapoja tehtäessä läpivalaisuja asuinkiinteistöissä ja vastaavissa julkisissa tiloissa. Täsmennykset koskevat erityisesti kuvaussuunnitelmaa ja aluerajauksia. (STUK 2015)

5.2 Muut Pohjoismaat

Muiden Pohjoismaiden säännösten selvittämiseksi lähetettiin kysely muiden Pohjoismaiden säteilyviranomaisten yhteyshenkilöille. Kyselyssä pyydettiin tietoja laitteiden käytöstä ja voimassa olevista säännöksistä:

1. What kind of regulations exists in your country for the use of pulsed X-Ray devices?
2. Do you require a license to use and possess pulsed X-ray devices?
3. How many pulsed X-ray devices there are in your country?
4. Which kind of applications are commonly used (e.g. X-ray of pipelines)?
5. Who has pulsed X-ray devices (e.g. industry, police)?
6. Do you require a suitable radiation meter, personal dosimetry and/or radiation alarm to be used?
7. Do you classify users as radiation workers? Is there a specific training required for the users?
8. Is there a restricted access to the exposed area? If yes, how large area (e.g. dose rate above xx $\mu\text{Sv/h}$ or a specific size e.g. xx m^2)? How is the area marked?

Kyselyyn saadut vastaukset käsitellään maakohtaisesti seuraavissa kappaleissa.

5.2.1 Ruotsi

Ruotsissa ei ole tällä hetkellä erillisiä säännöksiä koskien pulssiröntgenlaitteita vaan niitä koskevat teollisuusradiografian säännökset soveltuvin osin. Laitteiden käyttö perustuu lupaan ja luvan vaatimukset perustuvat vastaaviin teollisuusradiografian säännöksiin. Vuonna 2018 voimaan tulevissa uusissa säännöksissä on mahdollisesti mukana myös pulssiröntgenlaitteet, mutta vielä ei ole tiedossa, vaaditaanko jatkossa niiden käyttöä varten lupa vai riittääkö laitteen rekisteröinti.

Pulssiröntgenlaitteita teollisuusradiografiassa käyttävä henkilöstö luokitellaan eri säteilytyöntekijäluokkiin, muissa käyttökohteissa soveltuva koulutus riittää laitteen käyttöön. Luokan A säteilytyöntekijöillä on käytössään henkilökohtaiset dosimetrit, mutta muutoin pulssiröntgenlaitteita käyttäviltä henkilöiltä ei vaadita dosimetrien tai säteilymittareiden käyttöä.

Alueet rajataan vastaavasti kuin teollisuusradiografiassa: Alueilla, joilla on ihmisiä jatkuvasti, annosnopeus ei saa ylittää 2 $\mu\text{Sv/h}$. Alueilla, joilla työntekijät oleskelevat väliaikaisesti, annosnopeusraja on 20 $\mu\text{Sv/h}$ ja alue on merkittävä kyltein. Alueet, joilla annosnopeus ylittää 60 $\mu\text{Sv/h}$, täytyy sulkea.

Ruotsissa on käytössä noin 20 pulssiröntgenlaitetta. Pääasiallisia käyttäjiä ovat eri viranomaiset ja lisäksi on joitakin kaupallisia toiminnanharjoittajia. Laitteiden tyypilliset käyttökohteet liittyvät turvallisuuteen ja teollisuusradiografiaan.

5.2.2 Norja

Norjassa pulssiröntgenlaitteiden käyttöä säädellään eri tavoin sovelluskohteesta riippuen. Teollisuusradiografiassa (NDT), säteilytyksissä ja tutkimuskäytössä (ei lääketieteellinen käyttö) laitteiden käyttöön tarvitaan lupa Norjan säteilysuojeluviranomaiselta (NRPA), mutta joissakin tapauksissa (esimerkiksi eläinlääkärit) riittää ilmoitus viranomaiselle laitteen käytöstä.

Pulssiröntgenlaitteita käyttävät työntekijät luokitellaan säteilytyöntekijöiksi, mutta heidän annosrajansa ovat alhaisemmat kuin säteilytyöntekijöiden annosrajat. Laitteen käyttäjien on koulutauduttava säteilysuojelukurssilla (minimikesto 3 päivää). Jos laitetta käytetään sisätiloissa, vähintään yhden kurssin käyneen käyttäjän on oltava paikalla, kun taas ulkokäytössä käyttäjiä on oltava vähintään kaksi. Ainoastaan säteilysuojelukurssin käyneet käyttäjät voivat mennä alueelle, jolla annosnopeus ylittää 7,5 $\mu\text{Sv/h}$. Alue rajataan ionisoivan säteilyn merkein ja nauhalla. Lisäksi käyttäjillä on oltava käytössä soveltuva säteilymittari ja henkilökohtaiset dosimetrit.

Norjassa laitteita on käytössä muutamia kymmeniä. Pääasiallisia käyttäjiä ovat viranomaiset ja eläinlääkärit. Eläinlääkärit käyttävät laitteita kuvataksaan suuria eläimiä (esim. hevosia), jotka eivät mahdu tavanomaiseen tutkimushuoneeseen. Lupakäytäntö ei koske eläinlääketieteellisessä käytössä olevia laitteita. On kuitenkin mahdollista, että käytäntö muuttuu tulevaisuudessa ja myös eläinlääketieteellisessä käytössä olevat laitteet tulevat luvanvaraisiksi.

5.2.3 Tanska

Tanskassa ei ole tällä hetkellä erillisiä säädöksiä koskien pulssiröntgenlaitteita, vaan niitä koskevat samat vaatimukset kuin muita röntgenlaitteita. Myös laitteiden käyttöön vaadittava lupa vastaa muilta röntgenlaitteilta vaadittavaa lupaa.

Laitteiden käyttäjiltä vaaditaan vastaavan tyyppinen koulutus kuin muilta röntgenlaitteiden käyttäjiltä. Laitteiden käyttäjillä on käytössään TLD-dosimetrit ja lisäksi vaaditaan hälyttävät mittarit. Aluerajaus vastaa röntgenlaitteiden käytön alueita. Annosnopeuden ollessa suurempi kuin 60 $\mu\text{Sv/h}$, alueella oleskelu on kielletty. Laitteiden käyttäjien (operators) sijaintipaikassa annosnopeus ei saa olla suurempi kuin 20 $\mu\text{Sv/h}$ ja sivullisten henkilöiden oleskellessa alueella annosnopeus ei saa olla suurempi kuin 7,5 $\mu\text{Sv/h}$. Alue, jolla annosnopeus on 7,5–60 $\mu\text{Sv/h}$, on tarkkailualue, jolla voidaan tarvittaessa käydä pikaisesti.

Laitteita on käytössä parikymmentä kappaletta ja ne ovat pääasiallisesti viranomaiskäytössä.

5.2.4 Islanti

Islannissa pulssiröntgenlaitteiden käyttöä säädellään vastaavasti kuin muitakin laitteita, jotka tuottavat ionisoivaa säteilyä, ja niiden käyttöön vaaditaan lupa.

Laitteiden käyttäjät luokitellaan säteilytyöntekijöiksi ja he käyvät lyhyen kurssin, jonka Islannin säteilyturvallisuusviranomainen (Icelandic Radiation Safety Authority) järjestää. Säteilyhälyttimiä tulee käyttää laitteita käytettäessä.

Alue, jolla annosnopeus ylittää 7,5 µSv/h, tulee rajata säteilytyöntekijöille. Muulle väestölle altistusraja on 1 µSv/h.

Laitteita on käytössä muutama kappale ja niitä käytetään turvatoimissa sekä matkatavaroiden tutkimiseen.

5.3 Yhteenveto säännöksistä Pohjoismaissa

Muissa Pohjoismaissa on käytössä vähemmän akkukäyttöisiä pulssiröntgenlaitteita kuin Suomessa. Laitteet ovat kaikissa maissa tyypillisiä eri viranomaisten käytössä. Useimmat säännökset ovat vastaavia kuin Suomessa. Norjassa osa laitteista on vapautettu luvasta (ilmoitus laitteen käytöstä riittää), tällaista laitteiden käyttöä on esimerkiksi eläinlääkäreillä. Lisäksi Norjassa pulssiröntgenlaitetta käyttävien työntekijöiden annosraajat ovat alhaisemmat kuin Suomessa. Suomessa laitteita käytetään putkistojen kuvaamiseen, mitä ei tullut esiin muiden Pohjoismaiden kohdalla.

Taulukko 2. Yhteenveto säännöksistä Pohjoismaissa.

	Suomi	Ruotsi	Norja	Tanska	Islanti
Vaaditaanko lupa laitteiden käyttöön?	Kyllä	Kyllä	Osittain, joissakin tapauksissa ilmoitus riittää	Kyllä	Kyllä
Muut käyttäjät paitsi viranomaiset	Yksityiset toiminnanharjoittajat (esim. putkistojen kuvaus)	Lentokentät	Eläinlääkärit	-	-
Laitteiden lukumäärä (noin)	100	20	20+	20–25	3
Työntekijöiden luokittelu säteilytyöntekijöiksi	Luokittelu A muiden tehtävien perusteella, luokittelu B laitteen perusteella, ei välttämättä luokiteltu	Teollisuus-radiografiassa luokitellaan, muissa ei	Osa luokitellaan, osa ei	Kyllä	Kyllä
Säteilymittareiden/-hälyttimien käyttö	Soveltuva säteilymittari vaaditaan, poikkeava menettely hyväksyttävissä (käytännössä ei vaadita mittaria erikseen tälle laitteelle), dosimetrit	A-luokan työntekijöillä käytössä dosimetri, muilta ei vaadita	Soveltuva säteilymittari, dosimetrit	Kyllä, mittareiden soveltuvuutta ei ole tarkastettu (eivät sovellu välttämättä ko. käyttöön)	Kyllä
Annosnopeudet aluerajauksissa	Annosnopeus > 7,5 µSv/h (tarkkailualue, väestö), annosnopeus > 60 µSv/h (valvonta-alue)	Annosnopeus > 2 µSv/h (väestö), > 20 µSv/h (laitteiden käyttäjät väliaikainen oleskelu sallittu), > 60 µSv/h (suljettu)	Annosnopeus > 7,5 µSv/h (väestö), > 20 µSv/h (laitteiden käyttäjät), > 60 µSv/h (oleskelu kielletty)	Annosnopeus > 7,5 µSv/h (väestö), > 20 µSv/h (laitteiden käyttäjät), > 60 µSv/h (käyttäjät voivat tarvittaessa käydä lyhyesti)	Annosnopeus > 1 µSv/h (väestö), > 7,5 µSv/h (säteilytyöntekijät)

6 Johtopäätökset

6.1 Yhteenveto

Pulssiröntgenlaitteet ovat kevyitä, helposti liikuteltavia ja helppokäyttöisiä röntgenlaitteita. Niitä on käytössä turvallisuussovelluksissa (tutkinta) sekä rakennetta rikkomatomissa testauksissa/tutkinnassa (NDT) erilaisille rakenteille (esim. korroosio, putket) ja käyttösovellusten määrän odotetaan kasvavan tulevaisuudessa. Tällä hetkellä Suomessa ei ole yksityiskohtaisia säännöksiä pulssiröntgenlaitteiden käyttöön vaan valvonnassa sovelletaan teollisuusradiografian säännöksiä.

Pulssiröntgenlaitteista saatavan annosnopeuden mittaaminen luotettavasti on hankalaa johtuen lyhyestä pulssinleveydestä ja suuresta annosnopeudesta. Annoksen mittaaminen on luotettavampi menetelmä. Kaikki suojelukäyttöön tarkoitetut säteilymittarit eivät sovellu pulssimuotoisen säteilyn mittaamiseen. Markkinoilla kuitenkin on mittareita, joilla voi niiden valmistajien mukaan mitata luotettavasti pulssimuotoista röntgensäteilyä.

Tämän selvityksen yhteydessä mitattiin pulssiröntgenlaitteesta saatavia annoksia sekä tarkasteltiin aiemmin tehtyjä mittauksia. Tässä selvityksessä esitetyt annosmittaustulokset ovat yhteneviä valmistajan ja muiden toimijoiden raporttoimien mittaustulosten kanssa mittaustarkkuuden rajoissa. Mittaustulosten epävarmuus on suuri, mutta aiemmin julkaistujen tulosten ja tehtyjen toistomittausten avulla saadaan pulssiröntgenlaitteista saatavan annoksen taso selville varsin luotettavasti. Mittaustulosten perusteella voidaan myös todeta, että käytettävän mittarin valinnassa tulee olla huolellinen, koska mittarin sopivuus riippuu myös mittaustäsisyydestä sekä mittarin muista ominaisuuksista.

Mittaustuloksista havaitaan, että optimoitaessa kuvaukset hyvin ja noudatettaessa valmistajan ohjeistamaa suojaetäisyyttä, väestön annosrajat eivät ole vaarassa ylittyä vaan mahdolliset säteilyannokset jäävät hyvin pieniksi.

Keväällä 2017 Suomessa pulssiröntgenlaitteita oli käytössä noin sata kappaletta eri viranomaisilla ja yksityisillä toiminnanharjoittajilla. Käyttömääriltään eniten laitteita käyttää muutama yksityinen toiminnanharjoittaja. Tehdyn kyselytutkimuksen perusteella vaikuttaa, että toimijoilla on laitteiden käyttö hyvin hallinnassa. Todellista tietoa toimintatavoista ei kuitenkaan saa kuin (yllätys)tarkastusten aikana. Yksityisillä toimijoilla työntekijöiden käytössä on dosimetrit ja myös hälyttäviä säteilymittareita. Kaikkien näiden mittareiden soveltuvuudesta pulssimuotoiselle röntgensäteilylle ei kuitenkaan ole varmuutta. Kaikki toiminnanharjoittajat rajaavat suoja-alueen suositusten mukaan.

Muille pohjoismaisille viranomaisille tehdyn kyselyn perusteella havaitaan, että Suomessa on käytössä enemmän laitteita kuin muissa Pohjoismaissa yhteensä. Lisäksi Suomessa on enemmän yksityisillä toiminnanharjoittajilla käytössä olevia laitteita kuin muissa Pohjoismaissa. Suomessa yksityiset toiminnanharjoittajat käyttävät laitteita esimerkiksi putkistojen kuvaamiseen, mihin muissa Pohjoismaissa laitteita ei käytetä. On kuitenkin mahdollista, että jatkossa laitteiden käyttö tämäntyyppisissä sovelluksissa lisääntyy muissakin Pohjoismaissa. Norjassa eläinlääkärit käyttävät pulssiröntgenlaitteita isojen eläimien (esim. hevosten) kuvaamiseen, mihin Suomessa laitteita ei toistaiseksi käytetä.

6.2 Ehdotuksia vaatimuksiksi pulssiröntgenlaitteiden käyttöön

Kuten kaikessa säteilytyössä, myös pulssiröntgenlaitteita käytettäessä, säteilevien laitteiden käytön tulee olla hyvin optimoitua. Tällöin voidaan pitää laitteesta mahdollisesti saatava annos mahdollisimman pienenä.

Tehtyjen mittausten ja muiden saatavilla olevien mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että noudatettaessa valmistajan antamia suojaetäisyyksiä säteilyturvallisuus toteutuu. Näin ollen pulssiröntgenlaitteiden käytössä tulisi vaatia suojaetäisyyksien noudattamista.

Ohjeiden mukaisessa käytössä pulssiröntgenlaitteista saatavat annokset ovat hyvin pieniä. Myöskin poikkeavissa tapahtumissa (esimerkiksi henkilö suoraan laitteen keilassa lähellä laitetta) annos jää yhden kuvan osalta hyvin pieneksi. Poikkeavia tapahtumia tulisi olla kymmeniä ennen kuin väestölle asetettu 1 mSv annosraja ylittyy. Näin ollen, jos käytössä on ainoastaan pulssiröntgenlaite, työntekijöitä ei välttämättä tarvitsisi luokitella säteilytyöntekijöiksi eikä heidän myöskään tarvitsisi käyttää henkilökohtaista dosimetria. Toki, jos henkilökohtainen dosimetri on muista syistä olemassa, on sen käyttö suositeltavaa myös pulssiröntgenlaitteen käytön yhteydessä. Myöskään säteilymittarin käyttö ei olisi välttämätöntä pulssiröntgenlaitteiden käytön yhteydessä, sillä luotettavien annosmittausten toteuttaminen kenttäolosuhteissa on hankalaa eikä annosnopeusmittaus ole riittävän luotettava pulssiröntgenlaitteiden kohdalla. Turvajärjestelyissä taso C riittänee pulssiröntgenlaitteille, koska niiden käyttö on verrattavissa tavanomaisen liikuteltavan röntgenlaitteen käyttöön. Lisäksi kiinteistöjen kuvauksissa on syytä tiedottaa asukkaita tai julkisissa tiloissa oleskelevia.

Kokonaisuutena kuvausten hyvä optimointi ja suojaetäisyyden noudattaminen mahdollistavat säteilyturvallisuuden toteutumisen.

7 Kirjallisuusviitteet

Ambrosi P, Borowski M and Iwatschenko M, 2010. Considerations concerning the use of counting active personal dosimeters in pulsed fields of ionising radiation. *Radiation Protection Dosimetry*, 139(4), pp. 483–493.

Ankerhold U, Hupe O and Ambrosi P, 2009. Deficiencies of active electronic radiation protection dosimeters in pulsed fields. *Radiation Protection Dosimetry*, 135(3), pp. 149–153.

Far West Technology Inc, 2016. Pulse survey Meter 1030. Available: http://www.fwt.com/hpi/hpi_1030ds.htm [05/20, 2016].

Friedrich S and Hupe O, 2016. Dose measurements in pulsed radiation fields with commercially available measuring components. *Radiation Protection Dosimetry*, 168(3), pp. 322–329.

Golden Engineering Inc, 2016a. Products. Available: <http://www.goldenengineering.com/products.html> [03/29, 2016].

Golden Engineering Inc, 2016b. XRS-3 X-ray Source, Operator's manual. Available: <http://www.goldenengineering.com/pdf/XRS3OpNew.pdf> [05/10, 2016].

Golden Engineering Inc, 2017a. Golden Engineering X-ray unit output/leakage. Available: http://www.goldenengineering.com/pdf/Leakage_table.pdf [18/05,2017]

Golden Engineering Inc, 2017b. Safe Operating Procedure guideline. Available: http://www.goldenengineering.com/pdf/safe_operating_rocedure_guideline.pdf [18/05, 2017]

Gotz M, Karsch L and Pawelke J, 2015. Comparative investigation of three dose rate meters for their viability in pulsed radiation fields. *Journal of radiological protection : official journal of the Society for Radiological Protection*, 35(2), pp. 415–428.

ISO-4037-1:1996. X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 1: Radiation characteristics and production methods. Geneva, International Organization for Standardization.

Kaidin Frederiksen, P 1.6.2017, henkilökohtainen keskustelu sähköpostitse.

Latvala K., 08.05.2013. Pulssiröntgenkone Golden XRS 3 annosnopeus. Inspecta.

Ludlum Measurements Inc, 2016. 9DP-1 survey meter. Available: <http://ludlums.com/component/virtuemart/equipment-type-3/medical-117/radiation-safety-183/survey-meters-ion-chamber-190/ion-chamber-survey-meter-520-detail?Itemid=0> [05/19, 2016].

Mirion Technologies, 2016. DIS dosimetry system. Available: <https://www.mirion.com/products/radiation-detection-and-protection-instruments/personnel-exposure-monitoring-and-access-control/dis-dosimetry-system/> [05/20, 2016].

RTUTec, 2016. RAM-ION- ja RAD-ION survey meters. Available: <http://www.rtutec.com/#!radiation-meters/cvn4> [05/20, 2016].

STUK, 9.3.2012. Ohje ST 5.6 Säteilyturvallisuus teollisuusradiografiassa.

STUK, 24.3.2015. Kirje: Pienitehoisten, akkukäyttöisten pulssimuotoista säteilyä tuottavien läpivalaisulaitteiden käyttö asuinkiinteistöissä ja vastaavissa julkisissa tiloissa. Dnro 2/3005/2015.

STUK, 2016b. Kysely toiminnan harjoittajille pulssitaajuisten röntgenlaitteiden käytöstä ja vastaukset kyselyyn. Dnro 2/3197/2016.

Technical Associates, 2016. TBM-IC-PULSE survey meter. Available: <http://www.tech-associates.com/product-info/TBM-IC-Pulse-X.pdf> [05/19, 2016].

Teledyne ICM, 2016. CP120B equipment, Available: <http://www.teledyneicm.com/products/ndt/cp120b> [01/26, 2016].

Zutz H and Hupe O, 2013. Recent results of irradiations of DIS-1 dosimeters with an XR200 X-ray flash unit. *Radiation Protection Dosimetry*, 154(4), pp. 401–404.

Zutz H, Hupe O, Ambrosi P and Klammer J, 2012. Determination of relevant parameters for the use of electronic dosimeters in pulsed fields of ionising radiation. *Radiation Protection Dosimetry*, 151(3), pp. 403–410.

STUK-B sarjan julkaisuja

STUK-B 219 Nylund R. Pulssiröntgenlaitteet teollisuus- ja tutkimuskäytössä.

STUK-B 218 Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. 6th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention.

STUK-B 217 Pastila R (ed.). Radiation practices. Annual report 2016.

STUK-B 216 Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 1/2017.

STUK-B 215 Vesterbacka P (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2016. – Strålningsövervakning av miljön i Finland. Årsrapport 2016. – Surveillance of Environmental Radiation in Finland. Annual Report 2016.

STUK-B 214 Kainulainen E (ed.). Regulatory oversight of nuclear safety in Finland. Annual report 2016.

STUK-B 213 Pastila R (toim.). Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2016.

STUK-B 212 Kainulainen E (toim.). Ydinenergian käytön turvallisuusvalvonta. Vuosiraportti 2016.

STUK-B 211 Okko O (ed.). Implementing nuclear non-proliferation in Finland. Regulatory control, international cooperation and the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. Annual report 2016.

STUK-B 210 Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 3/2016.

STUK-B 209 Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 1-2/2016.

STUK-B 208 Lehto J. Säteilyturvallisuus hiukkaskiihdyttimien käytössä.

STUK-B 207 Suutari J (toim.). Radiologisten tutkimusten ja toimenpiteiden määrät vuonna 2015.

STUK-B 206 Pastila R (ed.). Radiation practices. Annual report 2015.

STUK-B 205 Finnish report on nuclear safety. Finnish 7th national report as referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety.

STUK-B 204 Vesterbacka P (toim.). Ympäristön säteilyvalvonta Suomessa. Vuosiraportti 2015. – Strålningsövervakning av miljön i Finland. Årsrapport 2015. – Surveillance of Environmental Radiation in Finland. Annual Report 2015.

STUK-B 203 Kainulainen E (ed.). Regulatory oversight of nuclear safety in Finland. Annual report 2015.

STUK-B 202 Pastila R (toim.). Säteilyn käyttö ja muu säteilylle altistava toiminta. Vuosiraportti 2015.

STUK-B 201 Kainulainen E (toim.). Ydinenergian käytön turvallisuusvalvonta. Vuosiraportti 2015.

STUK-B 200 Okko O (ed.). Implementing nuclear non-proliferation in Finland. Regulatory control, international cooperation and the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty. Annual report 2015.

STUK-B 199 Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 3/2015.

STUK-B 198 Julin S (toim.). Varautuminen säteilytilanteisiin ja poikkeavat tapahtumat. Kolmannesvuosiraportti 2/2015.

STUK-B-raportit STUKin verkkosivuilla:
www.stuk.fi/julkaisut/valvontaraportit



Laippatie 4, 00880 Helsinki
Puh. (09) 759 881, fax (09) 759 88 500
www.stuk.fi

ISBN 978-952-309-392-8 (pdf)
ISSN 2243-1896
Helsinki 2017